

**Corso di**  
***Grafica Computazionale***  
***Tecniche avanzate di Illuminazione***

**Docente:**  
**Massimiliano Corsini**

**Laurea Specialistica in Ing. Informatica**

**Facoltà di Ingegneria**

**Università degli Studi di Siena**



# Overview

- Modello di Illuminazione di Cook-Torrance
- Modello di Illuminazione di Oren-Nayar
- Modello di Illuminazione di Minnaert
- Ambient Occlusion



# Modello di Phong

- Finora abbiamo visto il modello di illuminazione locale di Phong
- Vantaggio principale:
  - Ha un buon rapporto complessità/risultati
- Svantaggio principale:
  - Effetto “plastica”
- È un modello basato sull’osservazione empirica



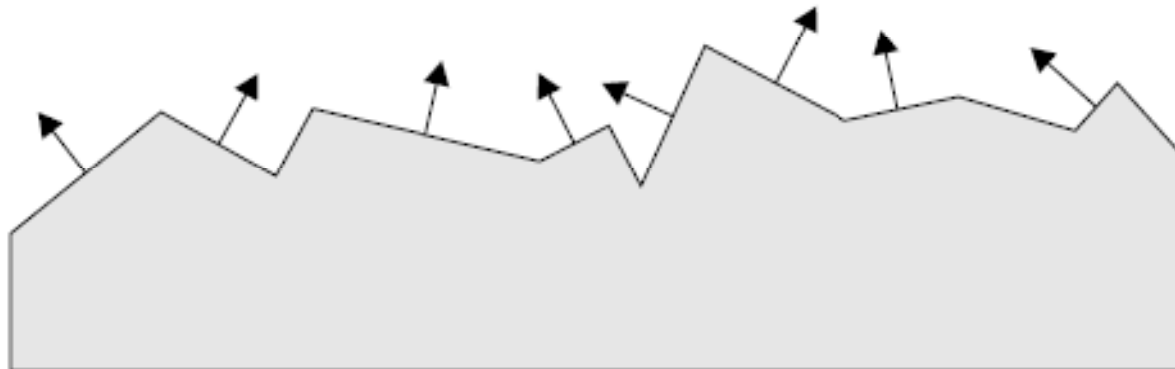
# Modello di Blinn

- James Blinn (1977) propose il primo modello basato su considerazioni fisiche.
- Il modello di illuminazione di Blinn si basava su un modello della riflessione della luce sviluppato da Torrance e Sparrow.



# Modello di Torrance-Sparrow

- Il modello di riflessione Torrance-Sparrow assume che la superficie sia composta da un insieme di piccolissime facce (microfacce) che si comportano come piccoli specchi. La distribuzione dell'orientazione delle microfacce determina la componente speculare della luce.





# Modello di Cook-Torrance

- Cook e Torrance migliorarono il modello di Blinn introducendo due ulteriori principi fisici:
  - Conservazione dell'energia (luce incidente = luce riflessa)
  - Variazioni del colore dello specular highlight



# Modello di Cook-Torrance

$$R_s = \frac{F D G}{(\vec{N} \cdot \vec{L})(\vec{N} \cdot \vec{V})}$$

- $F \rightarrow$  fattore di Fresnel
- $D \rightarrow$  dipende dalla distribuzione delle microfacce e modella la rugosità del materiale
- $G \rightarrow$  termine che dipende dalla geometria della superficie



# Il fattore di Rugosità ( $D$ )

- Il termine  $D$  modella la rugosità del materiale utilizzando una distribuzione delle microfacce
- Cook-Torrance utilizzarono la distribuzione di Beckmann-Spizzichino:

$$R_s = \frac{1}{m^2 \cos^2 \alpha} \exp \left( -\frac{\tan^2 \alpha}{m^2} \right)$$

- $m$  è lo *slope* medio delle microfacce
- $\alpha$  è l'angolo tra la normale (N) e l'*half vector* (H)





# Half Vector (**H**)

- Per capire cos'è questo vettore riprendiamo in mano il modello di Phong; la componente speculare della luce riflessa è data da:

$$R_s = K_s I_L (R \cdot V)^n$$

- È possibile dimostrare matematicamente che, considerando il vettore  $\mathbf{H} = (\mathbf{V} + \mathbf{L}) / 2$ , ossia il vettore di mezzo tra il punto di vista e la direzione della luce, si può ottenere una relazione approssimata da sostituire a questa.



# Half Vector (**H**)

- In particolare l'approssimazione è:

$$(R \cdot V)^n \approx (N \cdot H)^{4n}$$

- Quindi, il modello di illuminazione di Phong con questa approssimazione diventa:

$$I_o = K_a I_a + K_d I_L (N \cdot L) + K_s I_L (N \cdot H)^n$$

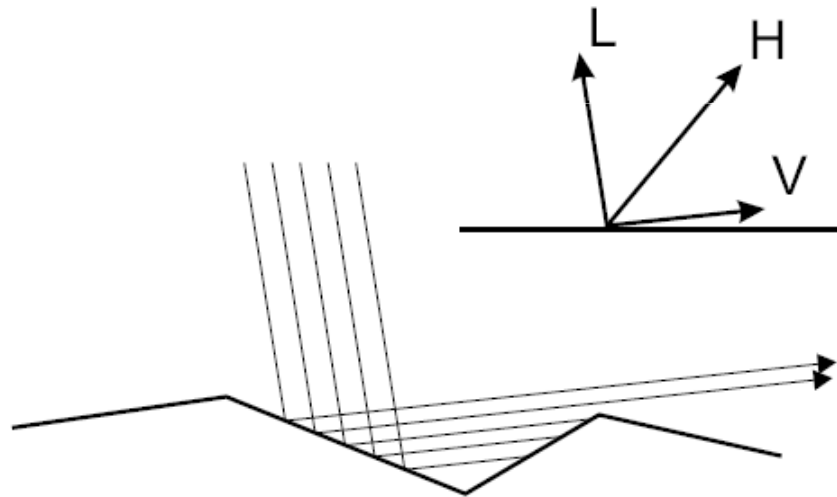
- L'uso di  $(N \cdot H)$  al posto di  $(R \cdot V)$  permette di ottenere un risultato molto simile al modello di Phong senza dover calcolare il vettore riflessione  $R$ .



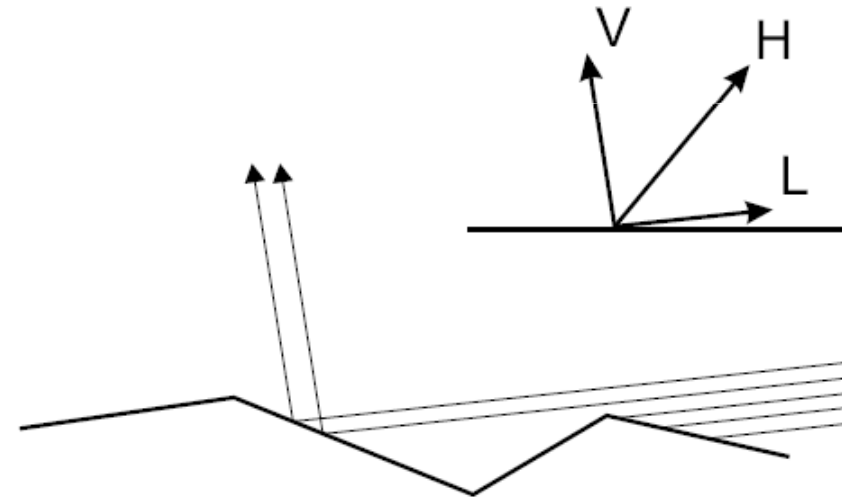
# Il fattore geometrico ( $G$ )

Facoltà di  
Ingegneria

- Il fattore  $G$  è un fattore di attenuazione che tiene conto degli effetti di masking e shadowing delle microfacce:



**Effetto di Masking**



**Effetto di Shadowing**



# Effetti di Masking & Shadowing

- Effetto di Masking può essere espresso matematicamente nel seguente modo:

$$G_m = \frac{2(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{V})}{(\vec{V} \cdot \vec{H})}$$

- Effetto di Shadowing può essere espresso matematicamente nel seguente modo:

$$G_s = \frac{(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{L})}{(\vec{V} \cdot \vec{H})}$$



# Il fattore $G$

- Tenendo conto del fattore di masking e shadowing  $G$  può essere espresso come:

$$G = \min(1, G_m, G_s)$$



# Il fattore di Fresnel

- Il coefficiente di Fresnel tiene conto delle variazioni di colore dello specular highlight in funzione dell'angolo di incidenza e della lunghezza d'onda della luce.
- In generale il colore delle specular highlight dipende dalle proprietà del materiale eccetto quando l'angolo di incidenza della luce è molto basso.



# Il fattore di Fresnel

- Formula per il calcolo del coefficiente di Fresnel:

$$F = \frac{(g - c)^2}{2(g + c)^2} \left( 1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g + c) + 1)^2} \right)$$

$$c = (\vec{V} \cdot \vec{H})$$

$$g = \sqrt{\eta^2 + c^2 + 1}$$

- Formula approssimata:

$$F = \rho + (1 - \rho)(1 - (\vec{N} \cdot \vec{L}))^5$$



# Conservazione Energia

- Per tenere conto della conservazione dell'energia la luce incidente = luce riflessa
- Quindi, essendo il totale della luce riflessa formato da una componente diffusiva ( $R_d$ ) e da una componente speculare ( $R_s$ ) avremo:

$$K_d R_d + K_s R_s = R$$

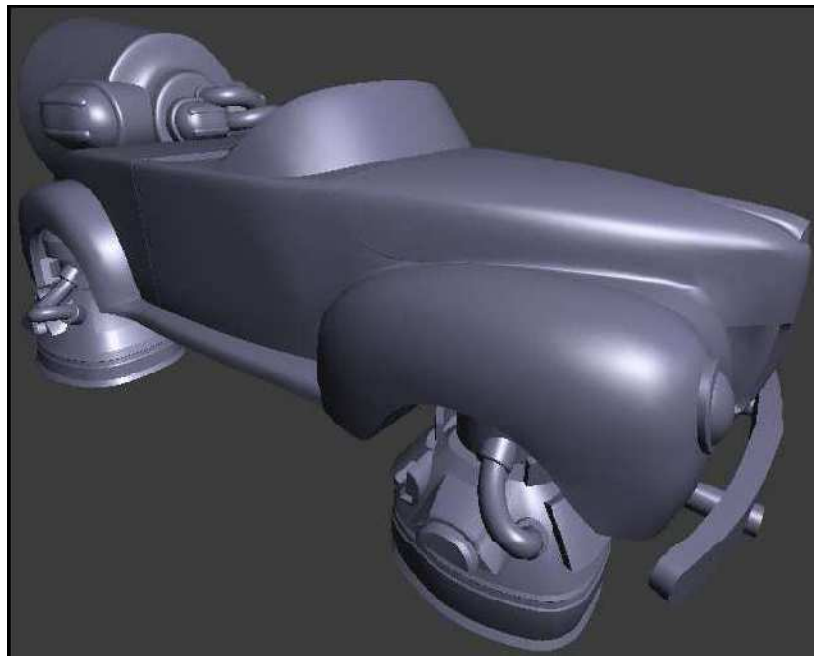
- Se ne conclude che  $K_d + K_s = 1$



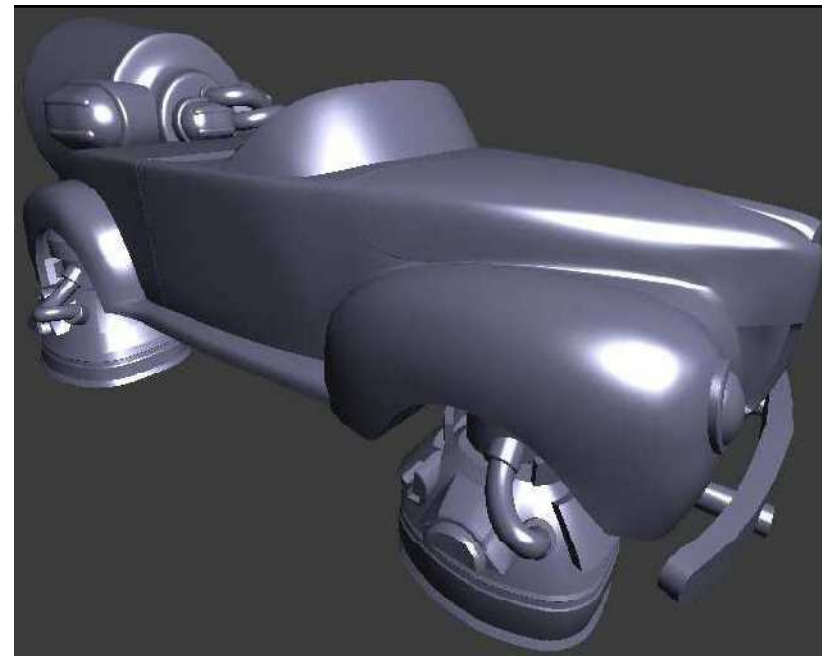


# Phong vs Cook-Torrance

Facoltà di  
Ingegneria



**Phong**



**Cook-Torrance**



# Modello di Oren-Nayar

- Oren e Nayar proposero questo modello diffusivo per descrivere meglio quei comportamenti ottici su cui il modello Lambertiano non era troppo attinente.
- Ad esempio, la porcellana e certi tessuti esibiscono il fenomeno della **retroreflessione** (la luce viene riflessa indietro nella direzione di provenienza).
- Questo crea un effetto di “appiattimento” dell’oggetto rispetto al modello Lambertiano (esempio: la luna).



# Modello di Oren-Nayar

- Una versione semplificata del modello matematico di Oren-Nayar è:

$$I_0 = K_D I_L (\vec{N} \cdot \vec{L}) (A + BC \sin(\alpha) \tan(\beta))$$

$$A = 1 - \frac{0.5\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33} \quad B = 0.45 \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09}$$

$$C = \max(0.0, \cos(\phi_V - \phi_L))$$

$$\theta_L = \arccos(N \cdot L) \quad \theta_V = \arccos(N \cdot V)$$

$$\alpha = \min(\theta_L, \theta_V)$$

$$\beta = \max(\theta_L, \theta_V)$$



# Modello di Oren-Nayar

- $\sigma$  modella la rugosità del materiale (Oren-Nayar assunsero che le microfacce seguissero una distribuzione Gaussiana a media nulla)
- $\phi_V - \phi_L$  è l'angolo di azimuth tra il vettore  $L$  e il vettore  $V$  che può essere calcolato considerando le proiezioni dei vettori  $L$  e  $V$  sul piano individuato dalla normale  $N$ :

$$\begin{aligned}\cos(\phi_V - \phi_L) &= (\vec{L}' \cdot \vec{V}') \\ \vec{L}' &= \vec{L} - (\vec{N} \cdot \vec{L})\vec{N} \\ \vec{V}' &= \vec{V} - (\vec{N} \cdot \vec{V})\vec{N}\end{aligned}$$



# Modello di Minneart

- Nasce inizialmente come un modello di shading sviluppato da Marcel Minnaert per altri scopi.
- Si dimostra un buon modello di illuminazione locale per oggetti come il velluto.

$$I_o = K_D I_L ((\vec{N} \cdot \vec{L})(\vec{N} \cdot \vec{V}))^{m-1}$$



# Ambient Occlusion

- È una tecnica per conferire maggiore realismo all'illuminazione della scena.
- L'idea base consiste nell'utilizzare un modello di illuminazione locale modulando la componente di ambiente secondo un fattore di attenuazione che dipende dalla geometria della scena.
- Il fattore di attenuazione è proporzionale alla quantità di luce che la geometria della scena occlude per quel dato punto.

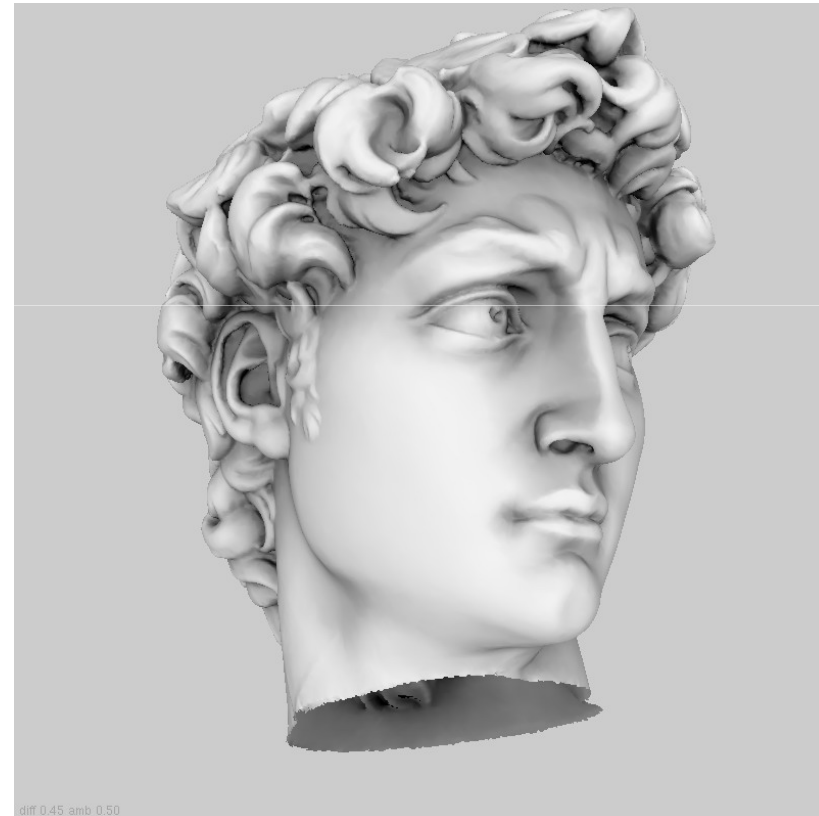


# Ambient Occlusion

- Studi dimostrano che l'Ambient Occlusion conferisce una migliore percezione della scena visualizzata.



**Standard OpenGL +  
Constant Ambient Term**



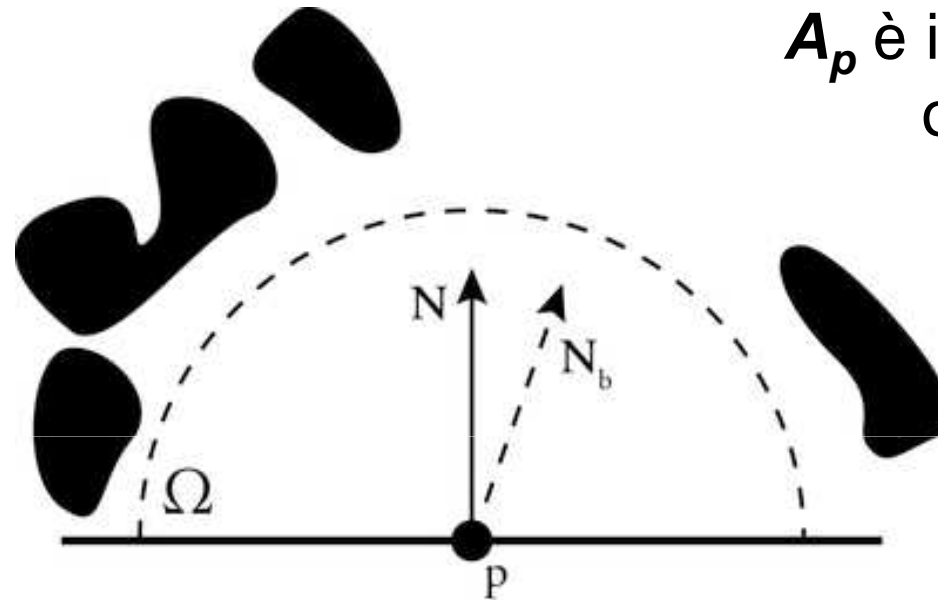
**con Ambient Occlusion**



# Ambient Occlusion

Facoltà di  
Ingegneria

$A_p$  è il coefficiente di  
occlusione



$$A_p = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} V(p, \omega) (N \cdot \omega) d\omega$$

$V(\cdot)$  è la funzione di visibilità  
(vale 1 se la direzione di vista non è occlusa, 0 altrimenti)





**Domande?**